

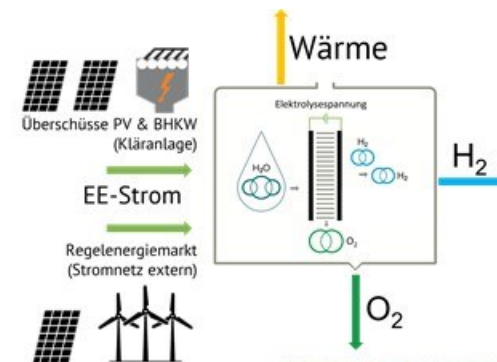
Kläranlagen als Elektrolysestandorte - Synergieeffekte, Nutzen und Potenziale

1. Wasserstofftagung Rheinland-Pfalz
Worms, 17. November 2022

Dipl.-Ing. Oliver Gretzschel

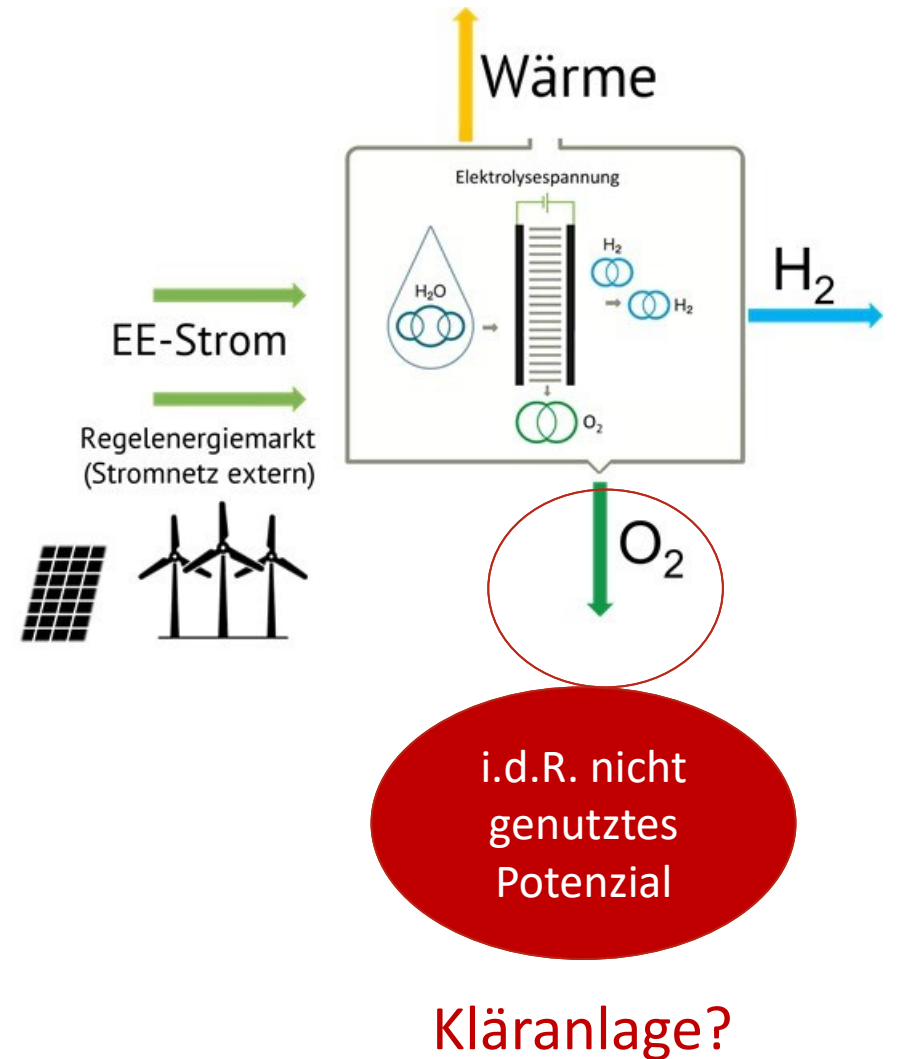
Dipl.-Ing. Benjamin Kihm

Dipl.-Ing. Yannick Taudien



1. Warum sind Kläranlagen als Elektrolysestandorte geeignet?
2. Nutzung Elektrolysesauerstoff zur **Energieeinsparung** (Bsp: KA Landau)
3. Nutzung Elektrolysesauerstoff für **erweiterten Gewässerschutz** (Bsp: KA Kaiserslautern)
4. Weitere Projektbeispiele (Bsp: KA Mainz, KA Trier)
5. Potenzial in Rheinland Pfalz
6. Fazit & Ausblick

- Bei der Elektrolyse fällt als **Koppelprodukt Sauerstoff** an, der normalerweise in die Atmosphäre abgelassen wird
- Bei Kläranlagen kann **der Sauerstoff für die biologische Abwasserreinigung** eingesetzt werden und ersetzt dabei Druckluft (**Energieeinsparung**)
- Zudem kann der **Sauerstoff vor Ort für die Erzeugung des nicht speicherbaren Oxidationsgases Ozon (O_3)** eingesetzt werden, mit dem eine weitergehende Reinigung möglich ist (**Gewässerschutz**)



- Zur Belüftung der biologischen Abwasserreinigung wird Druckluft hergestellt (Sauerstoffgehalt ca. 300 g/m^3)
- Die Bereitstellung erfolgt mit großen Kompressoren (Luftverdichtern)
- Die Belüftung ist der **größte Stromverbraucher der Abwasserreinigung** (ca. 50% Anteil an Gesamtstrombedarf)
- Der Stromeinsatz der Druckluftherzeugung liegt bei etwa **$0,08 - 0,12 \text{ kWh/kgO}_2$** .
(Näherungswert, der von vielen Faktoren abhängt!)



Foto Kläranlage Landau



Quelle: www.sulzer.com/

- Elektrolyseur benötigt etwa 55 kWh/kgH₂ bei einem Wirkungsgrad von ca. 70%
- Dabei fallen als Koppelprodukt pro kg H₂ etwa 8 kg O₂ als Reinsauerstoff (ca. 1400 g/m³) an

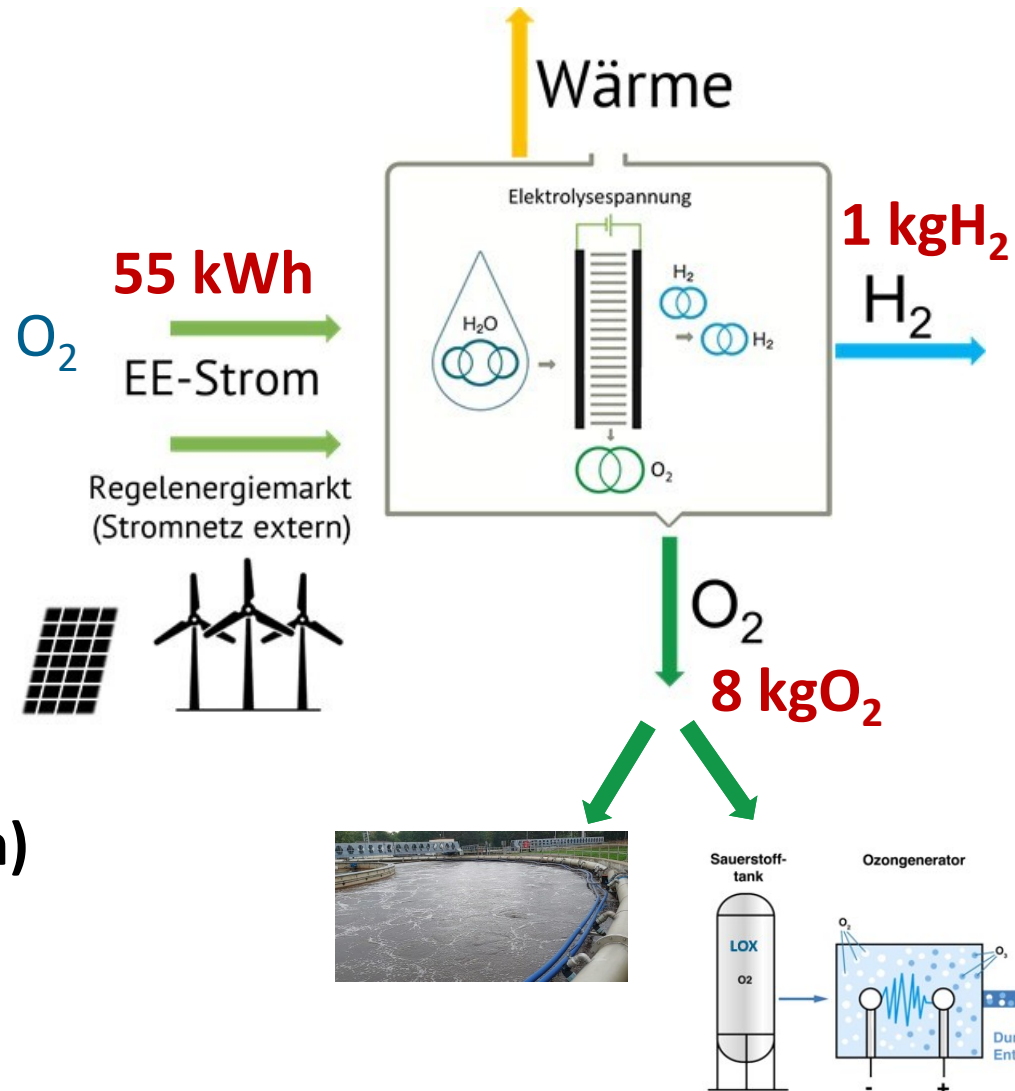
Fall 1: Elektrolysesauerstoff statt Druckluft

- Es könnten 8 kgO₂ x 0,08 (bzw. 0,12) kWh_{el}/kgO₂ = **0,64 - 0,96 kWh eingespart** werden (pro kgH₂)

Fall 2: Elektrolysesauerstoff statt LOX (Liquid Oxygen)

- Es könnten 8 kgO₂ x 0,64* kWh_{el}/kgO₂ = **5,12 kWh eingespart** werden (pro kgH₂)

*Benchmarkwert für LOX nach EIGA, 2010 (EUROPEAN INDUSTRIAL GASES ASSOCIATION)



- Anschluss an Erdgasnetz
- Hohe Kapazität der Stromversorgung
- Örtliche Nähe zu Kommunen/Gewerbegebieten (Sektorenkopplung)
- Möglichkeiten zur Nutzung Koppelprodukt O_2
- Vorhandenes Klärgas als CO_2 -Quelle für Methanisierung von Wasserstoff
- Geschultes Personal für Betrieb
- Gasspeicher und Aggregate zur Eigenstromproduktion, Potenzial für den Ausbau von EE vor Ort.



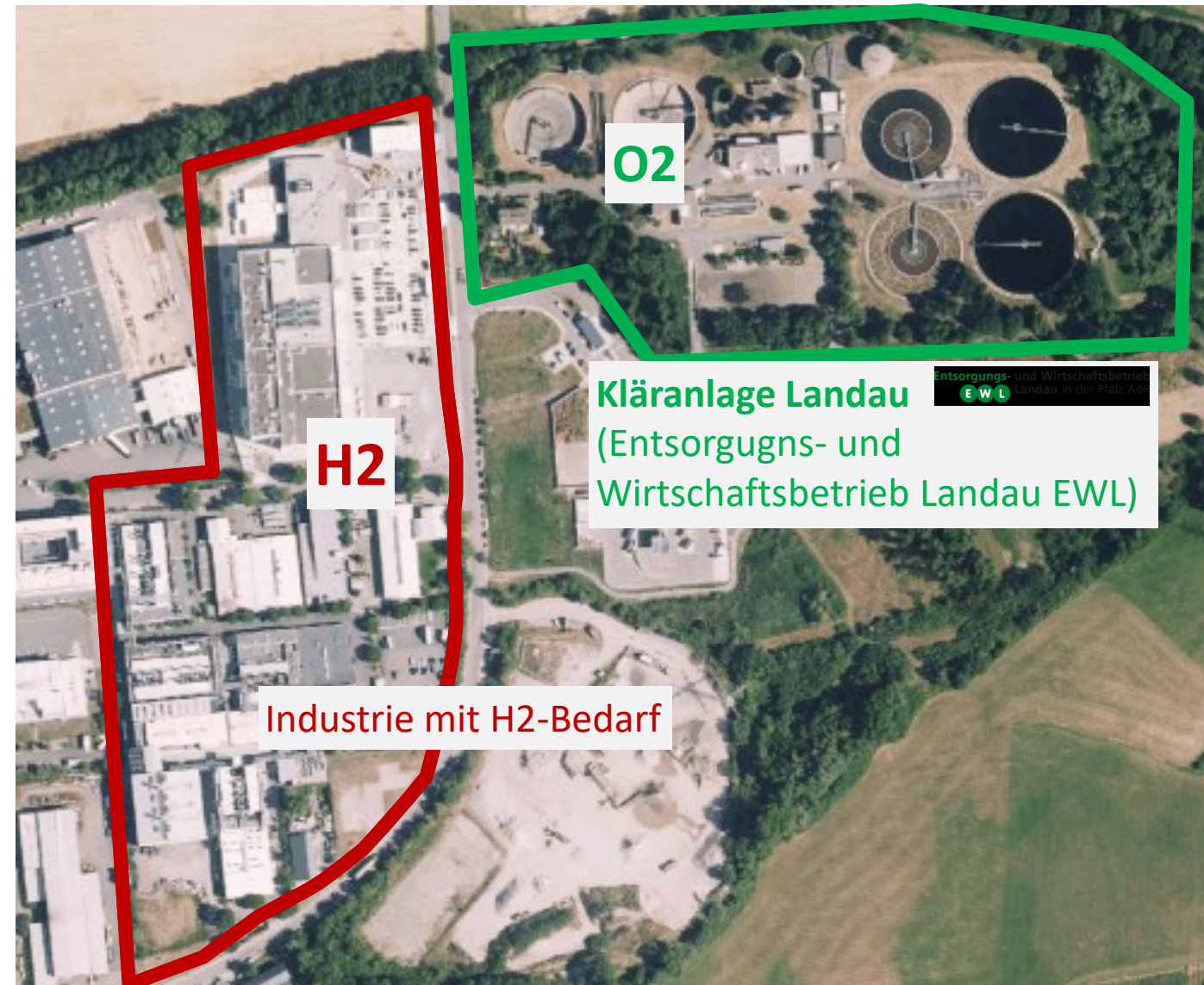
1. Warum sind Kläranlagen als Elektrolysestandorte geeignet?
2. Nutzung Elektrolysesauerstoff zur **Energieeinsparung** (Bsp: KA Landau)
3. Nutzung Elektrolysesauerstoff für **erweiterten Gewässerschutz** (Bsp: KA Kaiserslautern)
4. Weitere Projektbeispiele (Bsp: KA Mainz, KA Trier)
5. Potenzial in Rheinland Pfalz
6. Fazit & Ausblick

Geplant:

- Bis zu 5 MW Elektrolyseur
- Wasserstoff für Industrie (+Tankstelle)
- Übergabe Sauerstoff an Kläranlage

Herausforderung:

- Die Auslegung und Betriebsweise des Elektrolyseurs erfolgt H₂-geführt
- Der O₂-Bedarf der Kläranlage ist aber sehr variabel und muss immer sichergestellt sein



- **Sauerstoff für Belebungsbecken**
1 Becken: 9.000 – 13.000 kgO₂/d
2 Becken: 18.000 – 26.000 kgO₂/d
- **Bereitstellung als Druckluft**
(Verdichter)
- **Energieverbrauch**
ca. 600.000 - 800.000 kWh_{el}/a



Landau: Abdeckung O₂-Bedarf durch Elektrolyse

Elektrolysesauerstoff:

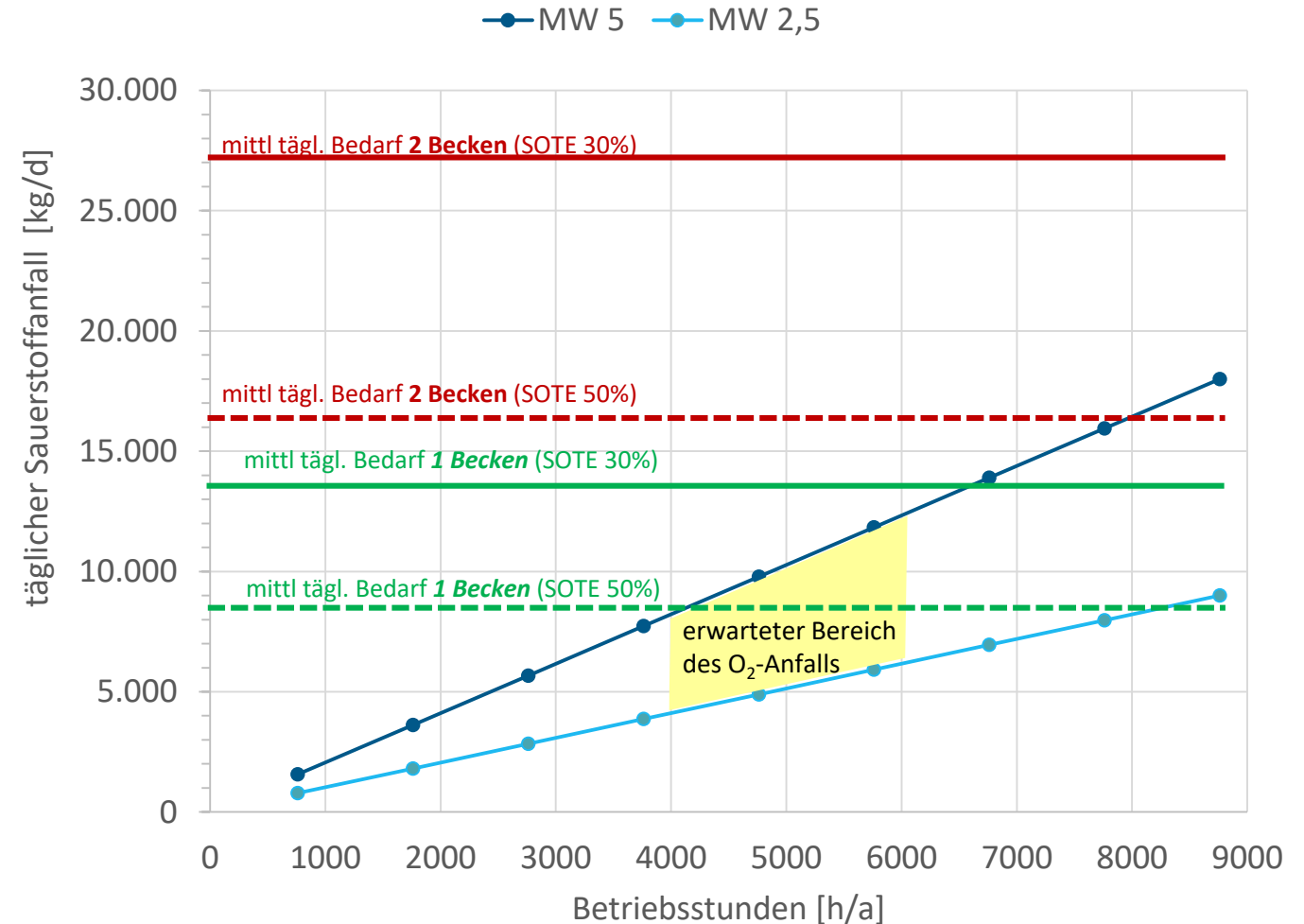
- Hier ca. 5.000 bis 12.000 kg O₂/d je nach Fahrweise

Problem:

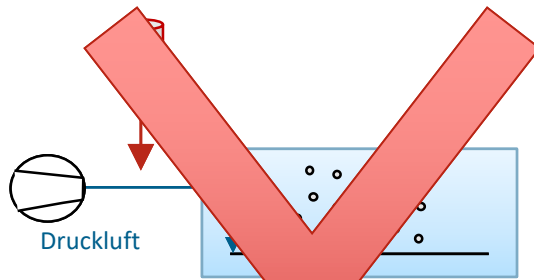
- Bedarf der Kläranlage muss zu jeder Zeit zu 100% bereitgestellt werden

Lösungsoptionen

- Backup mit Flüssigsauerstoff
- Hybrid-System Druckluft + Reinsauerstoff
- Zwischenspeicherung
- Versorgung nur 1 von 2 Belebungsbecken



Variante 1 Beimischung O₂ in vorhandene Luftleitung



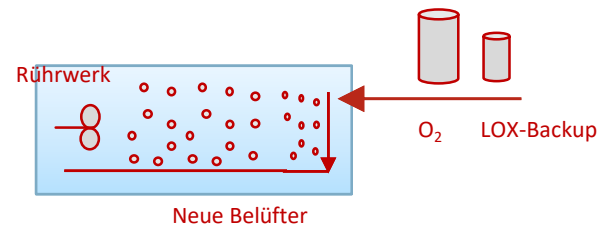
Nachteil:

- Luftleitung nicht für Reinsauerstoff ausgelegt (sicherheits-technische bedingungen)
- Druckluftsystem hat Restriktionen in Bezug auf den Mindestvolumenstrom (Limitiert O₂ Beimischung)
- Öl- und Fettfreiheit muss sichergestellt sein

Vorteil:

- Nutzung des bestehenden Belüftungssystems

Variante 2 Umstellung Belüftungssystem auf 100% Reinsauerstoff



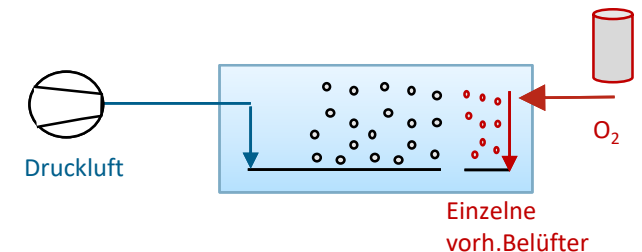
Nachteil:

- Umbau Belüftungseinrichtungen
- Ggf. Backuplösung mit Flüssigsauerstoff
- Rührwerk für Durchmischung notwendig
- Verfügbarer Reinsauerstoff muss den gesamten Bedarf durchgängig abdecken können

Vorteil:

- 100% Einsparung Druckluft (ca. 50% des Energiebedarfs der Kläranlage)

Variante 3 Hybrid-System, Druckluft und Reinsauerstoff parallel



Nachteil:

- Zwei Systeme parallel

Vorteil:

- Anteilige Einsparung Druckluft (X % des Energiebedarfs der Kläranlage)
- Nutzung bestehendes System
- Bestehendes System = Backup

Zwischenfazit

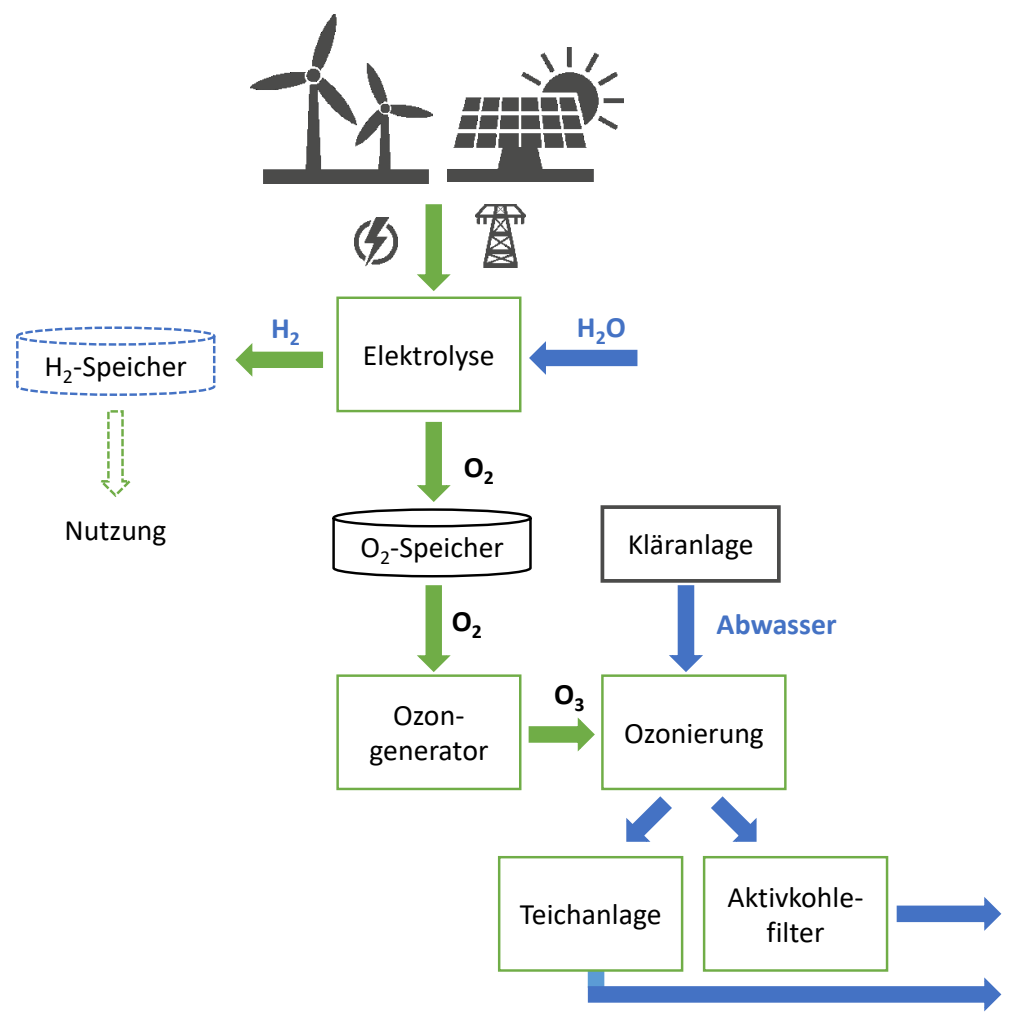
Reinsauerstoff statt Druckluft

- Die **Nutzung von Reinsauerstoff** ist technisch möglich
- Das Beispiel in Landau zeigt auf, dass jede Kläranlage individuell zu betrachten ist und **keine „Pauschallösung“** existiert.
- Die Leistung und **Fahrweise der Elektrolyse** ist von großer Bedeutung aber auch das O₂-Eintragssystem
- Die Verwendung zur Belüftung der Biologie erfordert je nach Konstellation **vor Ort Anpassungen am bestehenden System** ggf. eine Implementierung eines zusätzlichen/neuen Systems
- **Sicherheitsaspekte** (Öl- und Fettfreiheit) im Bereich der Sauerstoffnutzung sind zu beachten.



1. Warum sind Kläranlagen als Elektrolysestandorte geeignet?
2. Nutzung Elektrolysesauerstoff zur **Energieeinsparung** (Bsp: KA Landau)
3. Nutzung Elektrolysesauerstoff für **erweiterten Gewässerschutz** (Bsp: KA Kaiserslautern)
4. Weitere Projektbeispiele (Bsp: KA Mainz, KA Trier)
5. Potenzial in Rheinland Pfalz
6. Fazit & Ausblick

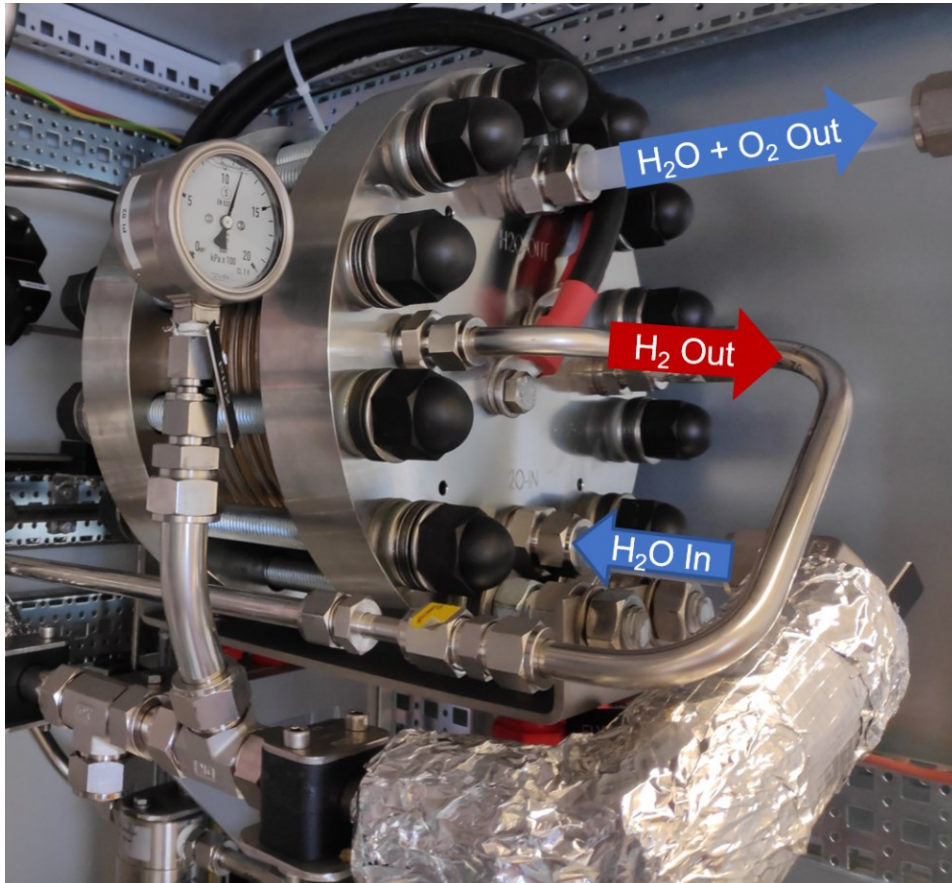
Abschlussbericht und mehr Informationen: <https://www.fona.de/de/bmbf-verbundprojekt-eloise-erfolgreich-abgeschlossen>



- **Standort:** KA Kaiserslautern
- **Projektlaufzeit** 2018 - 2021
- **PEM-Elektrolyseur**
 - Leistung 7,0 kW_{el}
 - 1,5 Nm³ H₂/h (0,135 kg/h)
 - 0,75 Nm³ O₂/h (1,07 kg/h)
 - O₂: 10 bar(g)
Taupunkt -70°C (1,5 ppm H₂O)
- **Versuchscontainer** mit O₂-Bündelspeicher, Ozonerzeuger und Ozonierung
- **GAK-Filterkolonne** (1 m³/h),
Teichanlage (30 l/h)



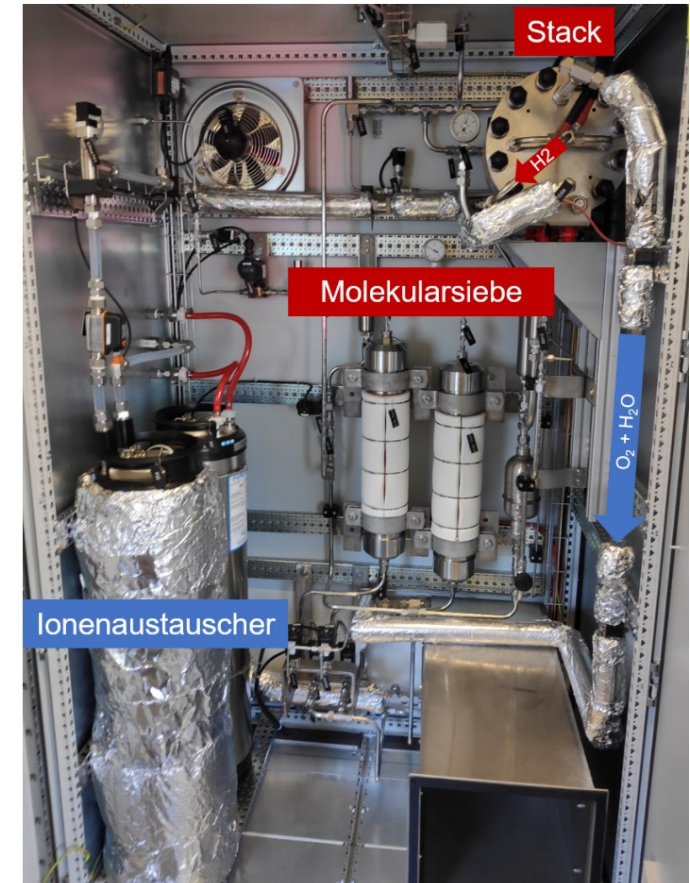
KA Kaiserslautern (<http://www.ste-kl.de>)



Stack

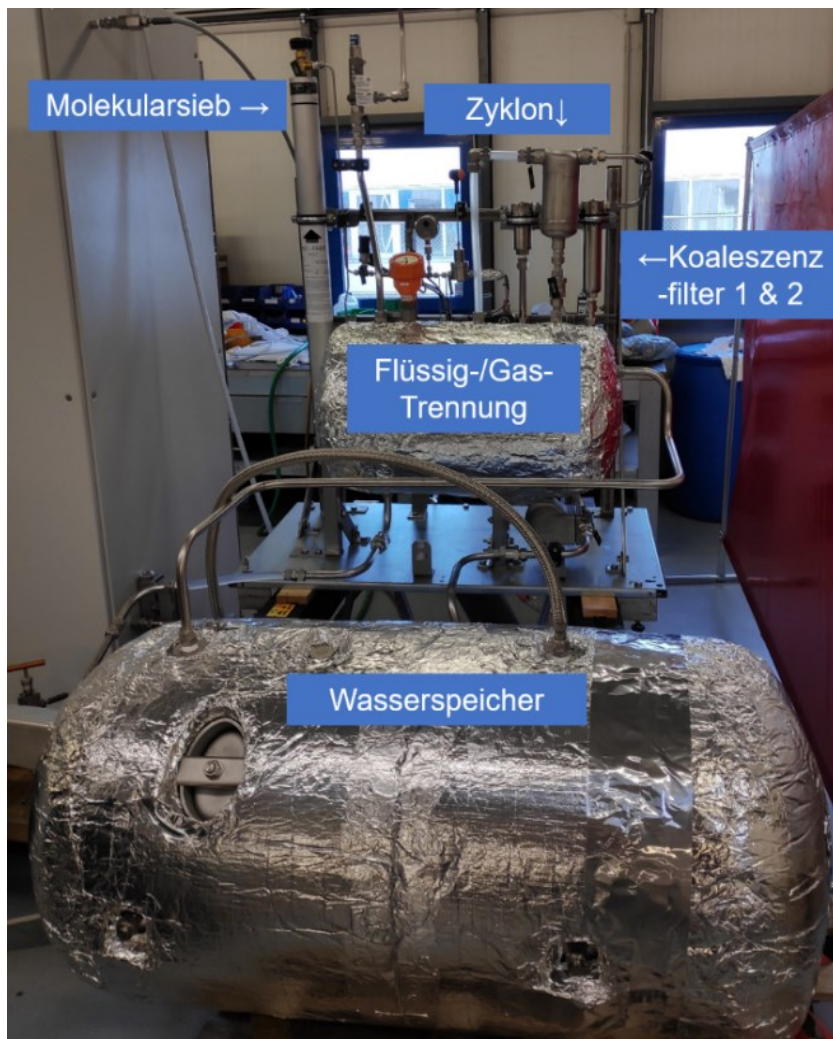


Wasserspeicher



Wasseraufbereitung /
H₂-Trocknung

O₂-Trocknung



Vortrocknung



Resttrocknung

Ozonierung (KA Kaiserslautern)



Ozonzeuger



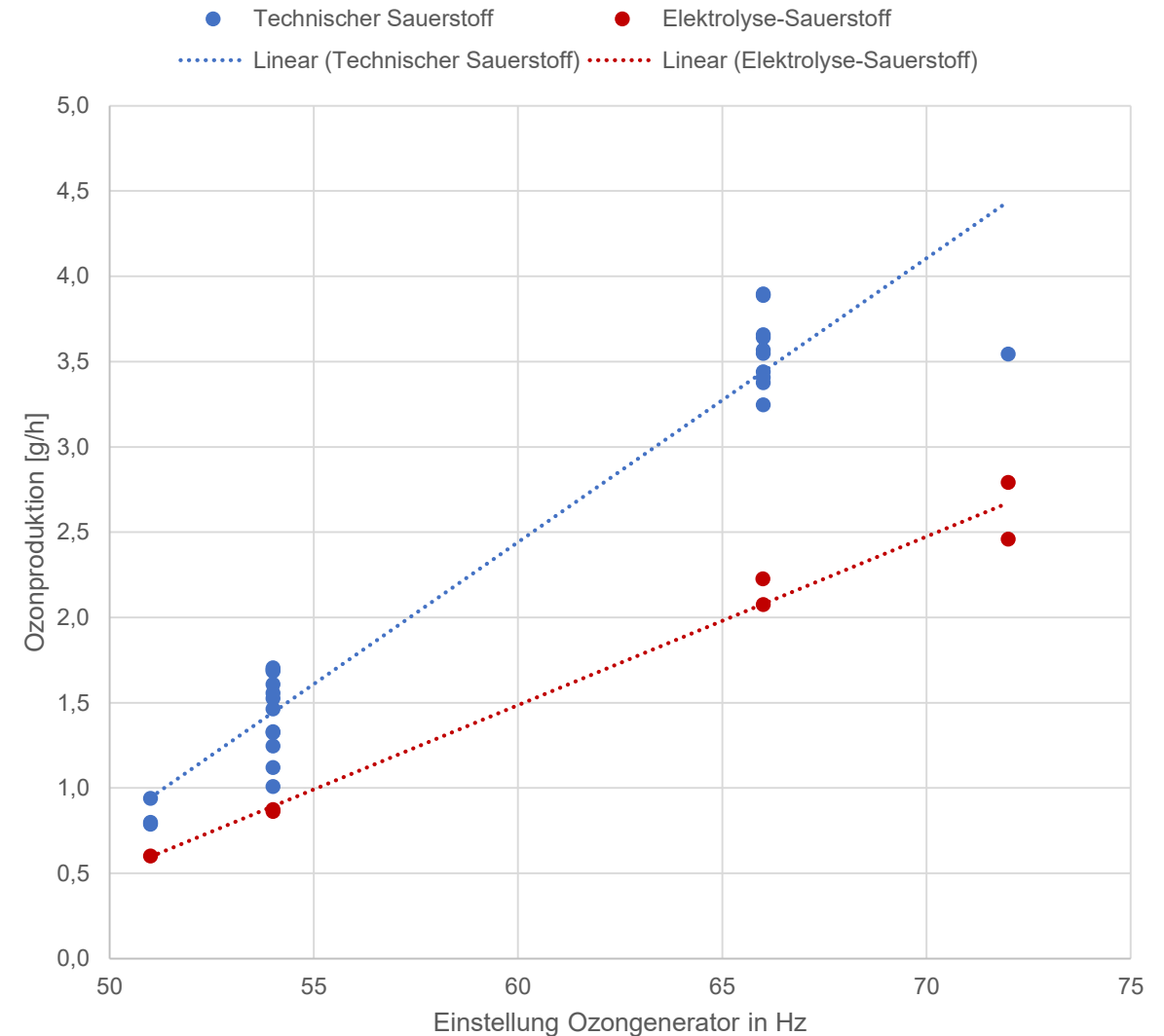
Ozonreaktor



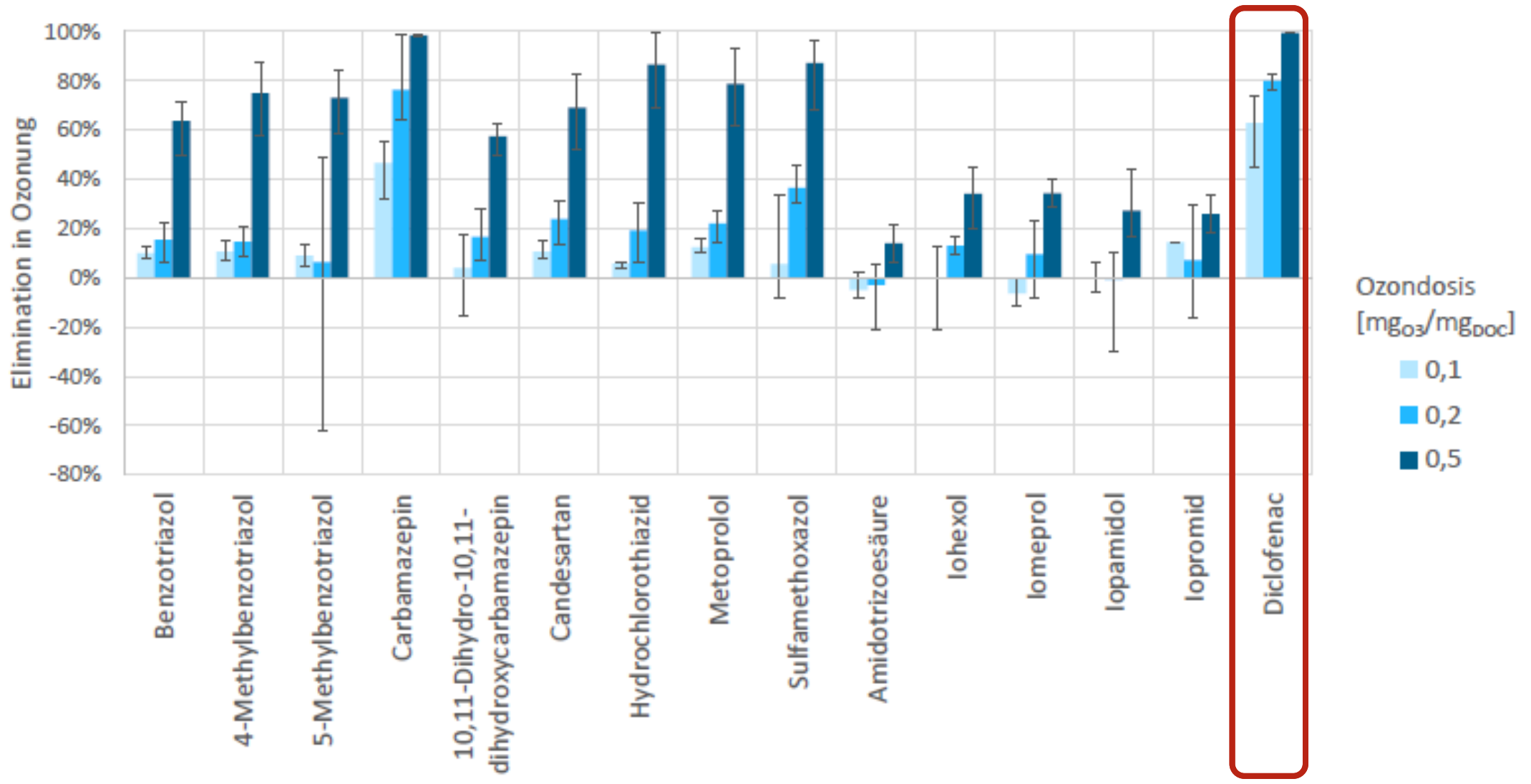
Schaltanlage

Ozonerzeugung mit Elektrolysesauerstoff

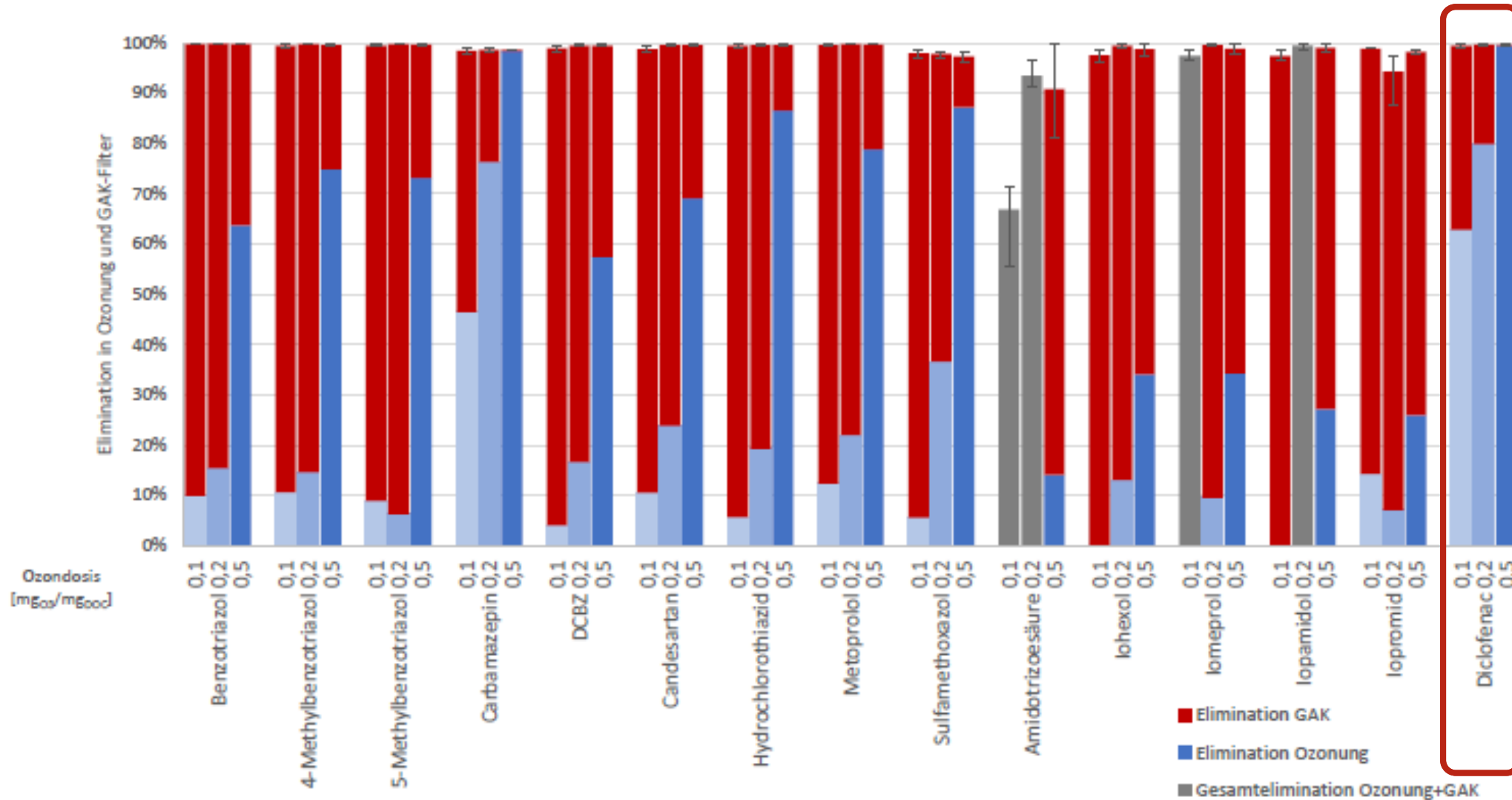
- **Ozonusbeute bis zu 40 % schlechter** bei Elektrolysesauerstoff
- **Elektrolysesauerstoff** trockener als Technischer Sauerstoff (eigentlich besser!)
- Mehr als **400 ppm (v) Wasserstoff** im Elektrolysesauerstoff nachgewiesen
- **Zusätzliche Qualitätsanforderung an die Sauerstoffaufbereitung: Wasserstoffanteil**



Ergebnisse: Spurenstoffelimination O₃



Spurenstoffelimination O₃ und GAK

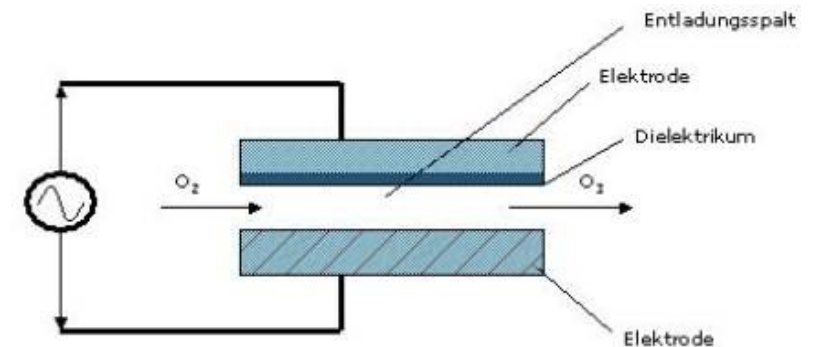


Anforderung an Sauerstoff aus Sicht der Ozonerzeugung:

- **O₂-Konzentration 93% - 97%**
(zu hoch verringert Ozonausbeute, aber Verdünnung mit Luft möglich)
- **Temperatur < 25°C**
(bei hohen Temperaturen zerfällt Ozon)
- **Taupunkt -70°C (=0,00165 g/m³)**
(Kondensation im Generator führt zu Korrosion)
- **Wasserstoffanteil: 1 ppm**
(H₂ ionisiert und kann u.a. mit OH-Radikalen zu H₂O reagieren)
- **Druck ca. ≥10 bar**
(Ozongenerator funktioniert auch bei atm. Druck, aber für Ausgleichsspeicher ist hoher Druck sinnvoll, und auch die Trocknung wird vereinfacht da Wasserdampfgehalt sinkt)



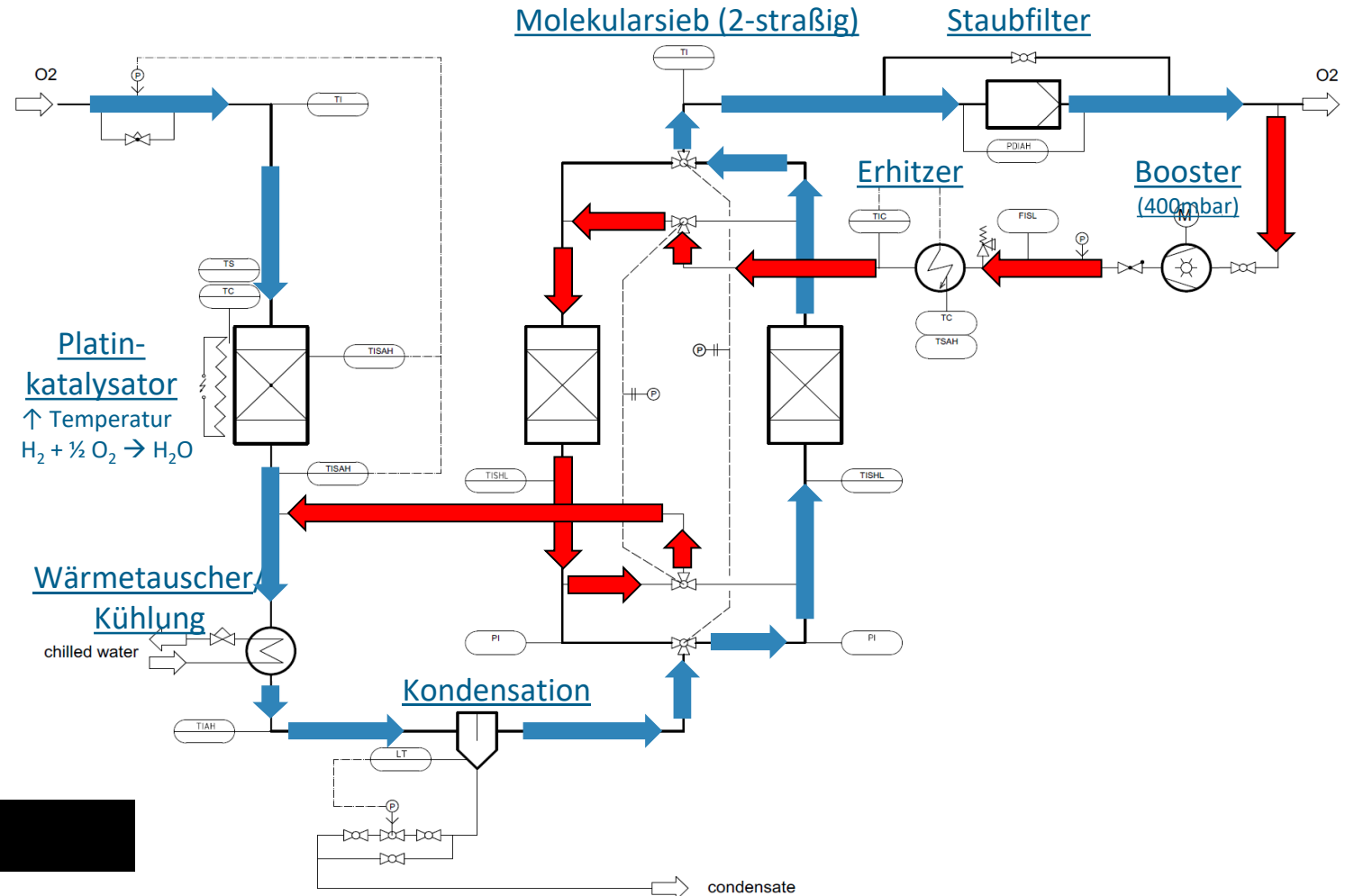
<https://www.xylem.com/de-de/brands/wedeco/wedeco-produkte/smoevoplus-ozone-system/>



Quelle: <https://www.lenntech.de/funktionsprinzip-eines-ozongenerators.htm>

mögl. technische Lösung

- z.B. Konzept der SILICA Verfahrenstechnik GmbH
- 1. Wasserstoffentfernung über Platinkatalysator
(Rest H₂ reagiert mit O₂ zu Wasser)
- 2. Grobtrocknung über Kühlung und Kondensation
- 3. Feintrocknung über Molekularsiebe
- 4. Regeneration mit einem erhitzten Teilstrom des O₂-Gases ohne Gasverlust



Elektrolysesauerstoff für Ozonbehandlung

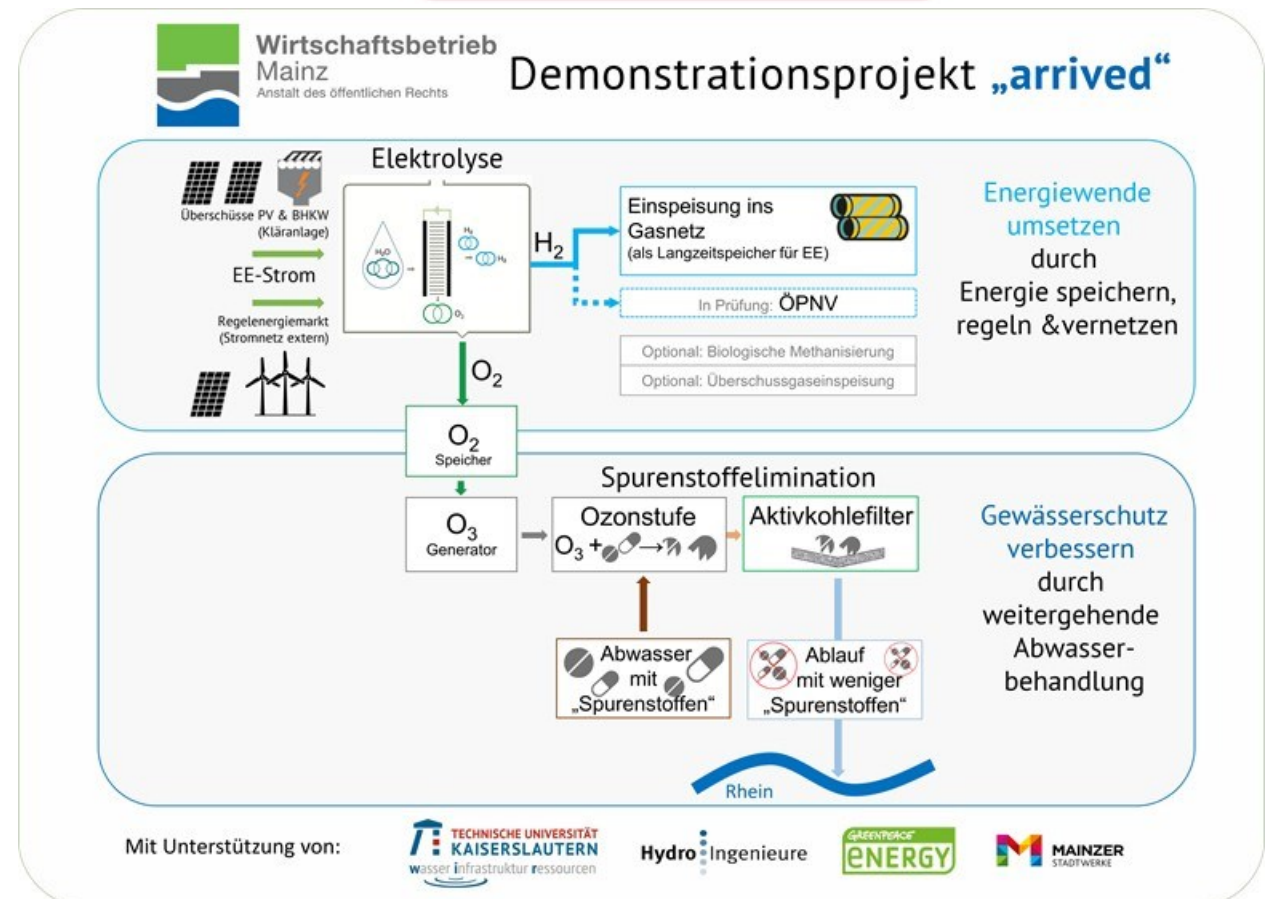
- Kläranlagen bieten sich für Projekte mit Elektrolyse an (Fläche, O₂-Bedarf, H₂-Nutzung).
- Die grundsätzliche **Umsetzbarkeit der Verfahrenskette** wurde mit dem Projekt bestätigt.
- Maßgeblich für den Einsatz des O₂ zur Ozonung ist die **Entfernung von Restfeuchte und H₂**.
- Der Elektrolyse-Sauerstoff weist einen **wirtschaftlichen Vorteil gegenüber Flüssigsauerstoff (LOX)** auf.
- Voraussetzung ist ein konstanter Netzbetrieb mit einer **bedarfsabhängigen Nachregelung** der Elektrolyse.
- Ein erhöhtes Potenzial besteht in der **O₂-Nutzung für die Belüftung** der biologische Stufe.

Inhalt

1. Warum sind Kläranlagen als Elektrolysestandorte geeignet?
2. Nutzung Elektrolysesauerstoff zur **Energieeinsparung** (Bsp: KA Landau)
3. Nutzung Elektrolysesauerstoff für **erweiterten Gewässerschutz** (Bsp: KA Kaiserslautern)
4. Weitere Projektbeispiele (Bsp: KA Mainz, KA Trier)
5. Potenzial in Rheinland Pfalz
6. Fazit & Ausblick

- Demonstrationsprojekt „arrived“
- Kläranlage Mainz (400.000 E)
- Elektrolyseur 1,25 MW
- **Energiewendedenliche Fahrweise**
- H₂-Einspeisung Gasnetz (ggf. auch für Mobilität)
- O₂-Bedarf: 750 t/a
O₂-Erzeugung: 600 t/a (3.500 VLH)
- Stadium: Planungsphase

Gefördert im Umwelt-Innovations-Programm & durch das Land Rheinland-Pfalz



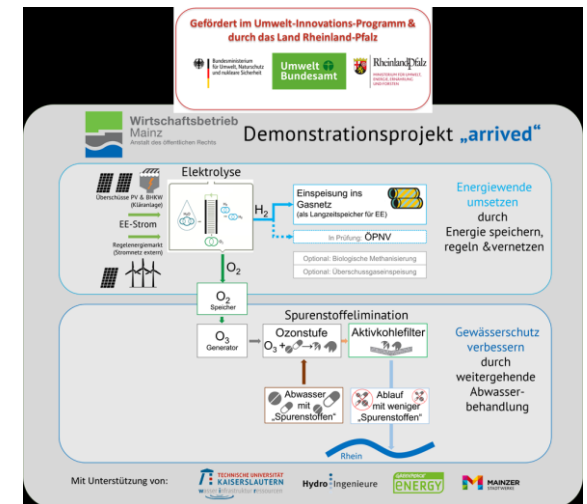
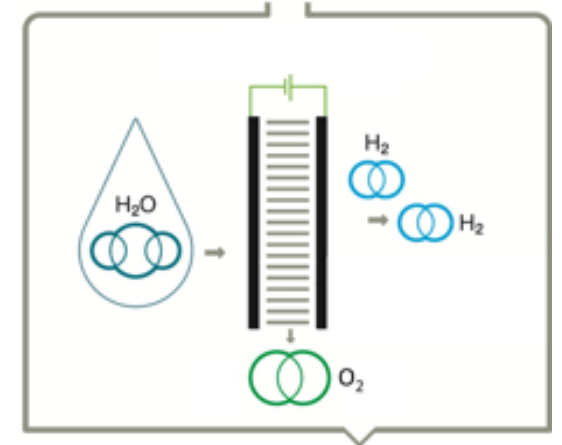
Beispiel Kläranlage Mainz Elektrolysebetrieb I

„Energiewendedenliche“ Rahmenbedingungen

- **Sauerstoff nicht als Hauptprodukt:** Aufgrund des hohen Energieaufwandes für die Elektrolyse sollte Sauerstoff allein als Kuppelprodukt entstehen (Ziel eher Wasserstoff)
- **Kein Dauerbetrieb unter Vollast:** → erzeugt sonst eine zusätzliche Last im Stromnetz, hemmt damit die Energiewende und schafft Platz für Kohle und Atom
- **Klimaneutralität:** Der Elektrolyseur muss klimaneutral mit Erneuerbaren Energien versorgt werden
 - fluktuierende Fahrweise des Elektrolyseurs in Bezug auf Angebot erneuerbarer Energie

Vorgehen:

- **Prüfung energiewendedenlicher Fahrweisen und Stromangebot am jeweiligen Standort!**

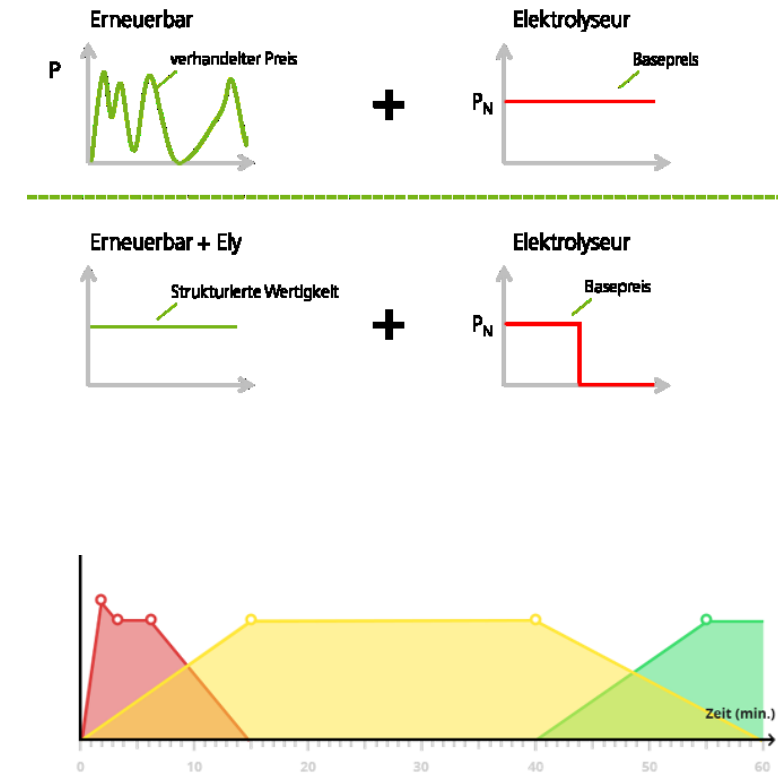


Ergebnis der Prüfung: Anbieten von Negativer Sekundärregelleistung (SRL)

- **Beitrag zur Netzstabilität**
- **Verdrängung konventioneller Kraftwerke** aus dem Regelleistungsmarkt
- **Verwendung von Überschussenergie**
- **netzdienlicher Betrieb des Elektrolyseurs** unterstützt Energiewende im Sektor Elektrizität
- Produktion wertvoller Biogase forciert **Sektorkopplung**

Umsetzung

1. Elektrolyseur läuft **dauerhaft auf Minimallastgrenze** (ca. 20%)
2. Im Fall des **Regelleistungsabrufs** wird Leistung des **Elektrolyseurs hochgefahren**
3. VLH in Abhängigkeit der Regelleistungsabrufe → Bei Platzierung mit geringen Leistungspreisen und börsenähnlichen Arbeitspreisen **VLH von 3.500 h realistisch**
4. Aufgrund von Unsicherheiten der tatsächlichen Regelleistungsabrufe, **Deckung des überwiegenden Sauerstoffbedarfs** für die 4. RS **durch das Minimallastband** empfohlen

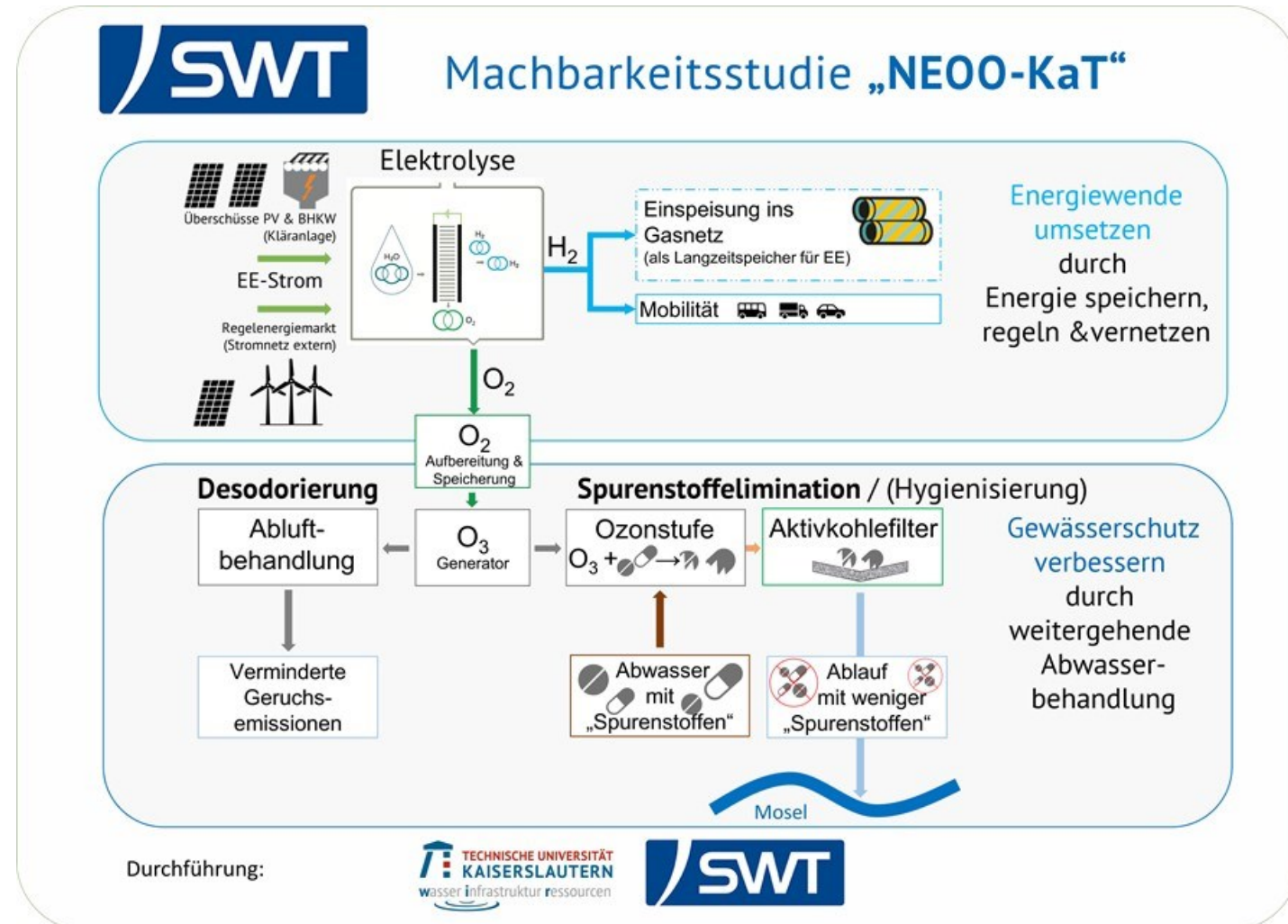


- Machbarkeitsstudie „NEOO-KaT“
- Kläranlage Trier (140.000 E)
- Elektrolyseur 1,0 MW
- Fahrweise noch offen
- H₂-Nutzung: Mobilität, i. b. ÖPNV
- O₂-Bedarf: ca. 300 t/a + Desodorierung
O₂-Erzeugung: > 480 t/a (bei 3.500 VLH)
- Stadium: Machbarkeitsstudie
- Gefördert durch



Rheinland-Pfalz

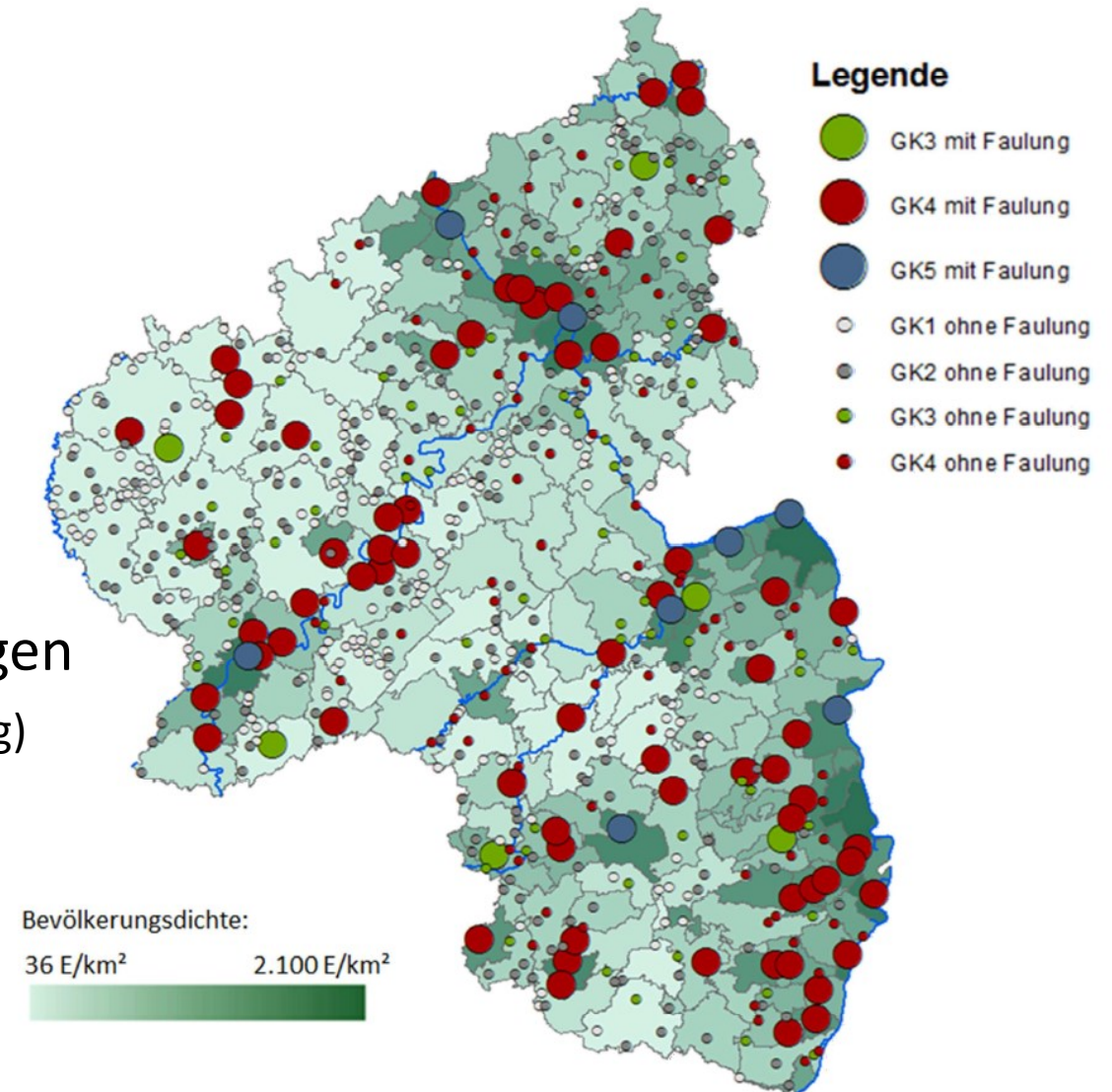
MINISTERIUM FÜR KLIMASCHUTZ, UMWELT, ENERGIE UND MOBILITÄT



Inhalt

1. Warum sind Kläranlagen als Elektrolysestandorte geeignet?
2. Nutzung Elektrolysesauerstoff zur **Energieeinsparung** (Bsp: KA Landau)
3. Nutzung Elektrolysesauerstoff für **erweiterten Gewässerschutz** (Bsp: KA Kaiserslautern)
4. Weitere Projektbeispiele (Bsp: KA Mainz, KA Trier)
5. Potenzial in Rheinland Pfalz
6. Fazit & Ausblick

- **675** kommunale Kläranlagen
- **Davon 84 größere Standorte (GK 4 & 5)**
> 10.000 Einwohnerwerte EW mit Faulung
- **Ausbaugröße der Faulungsanlagen**
4,2 Mio. EW (6,9 Mio. EW inklusive BASF SE)
- **Stromverbrauch** für Belüftung auf den 84 Anlagen
4,2 Mio. E * 10 kWh/E/a (theor. Idealwert für Belüftung)
= 42 Mio. kWh/a
- **Einsparpotenzial** bei 60% Bereitstellung O₂
durch Elektrolysesauerstoff: **25 Mio. kWh/a**



Quelle: Projekt ZEBRAS (Knerr et al, 2016)

1. Warum sind Kläranlagen als Elektrolysestandorte geeignet?
2. Nutzung Elektrolysesauerstoff zur **Energieeinsparung** (Bsp: KA Landau)
3. Nutzung Elektrolysesauerstoff für **erweiterten Gewässerschutz** (Bsp: KA Kaiserslautern)
4. Weitere Projektbeispiele (Bsp: KA Mainz, KA Trier)
5. Potenzial in Rheinland Pfalz
6. Fazit & Ausblick

- **Kläranlagen** eignen sich sehr gut als **Standorte für Wasserstoffherzeugung**
- Auch ein **Verbund** mit benachbarter **Industrie** ist denkbar
- Der **Sauerstoff** aus einer Elektrolyse kann entweder zur erweiterten Abwasserreinigung durch **Ozonbehandlung** (Gewässerschutz) oder zur **Reduzierung** der eingesetzten **Druckluft** (Energieeinsparung) verwendet werden
- Weitergehende **PtX Konzepte sind ebenfalls sehr gut vorstellbar**, durch die vorhandene Faulgasproduktion steht CO_2 für eine Methanisierung zur Verfügung
- Es gibt **mindestens 80 potenzielle Kläranlagenstandorte in Rheinland-Pfalz**
- Sollten an diesen 80 Standorten 60% der Belüftungsenergie durch Elektrolysesauerstoff gedeckt werden, **könnten 25 Mio. kWh eingespart werden** und stattdessen damit ggf. Wasserstoff erzeugt werden

Ausblick - PtX-Konzepte

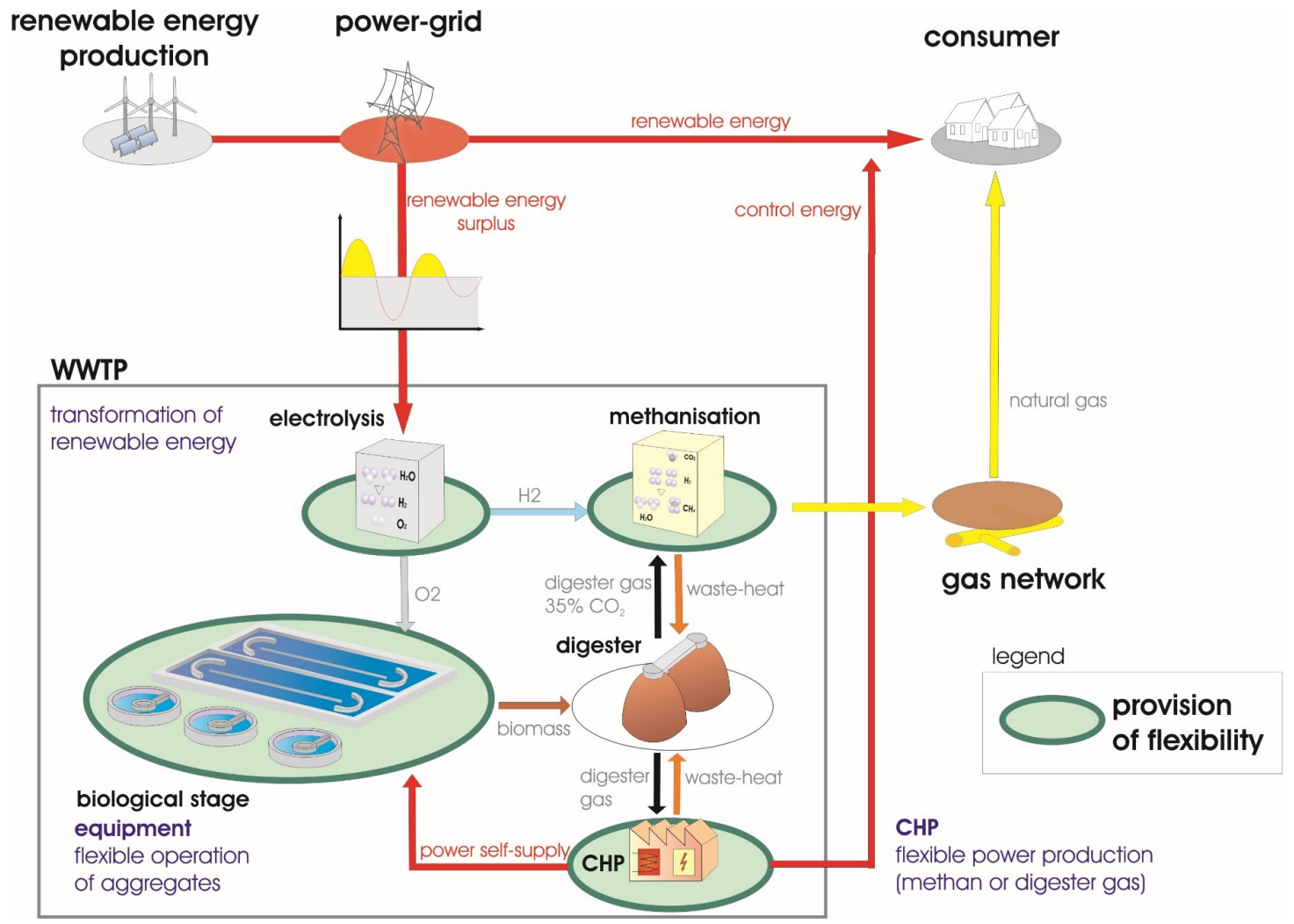


Abwasserreinigungsanlagen als Regelbaustein in intelligenten Verteilnetzen mit erneuerbarer Energieerzeugung

2014-2017

Technische Universität Kaiserslautern
 Bergische Universität Wuppertal
 iGas GmbH
 TSB, Institut für Innovation, Transfer und Beratung gemeinnützige GmbH – ITB
 Stadtwerke Radevormwald GmbH
 Wupperverband
 Wupperverbandsgesellschaft für integrale Wasserwirtschaft mbH - WiW

→ erwas-arrivee.de





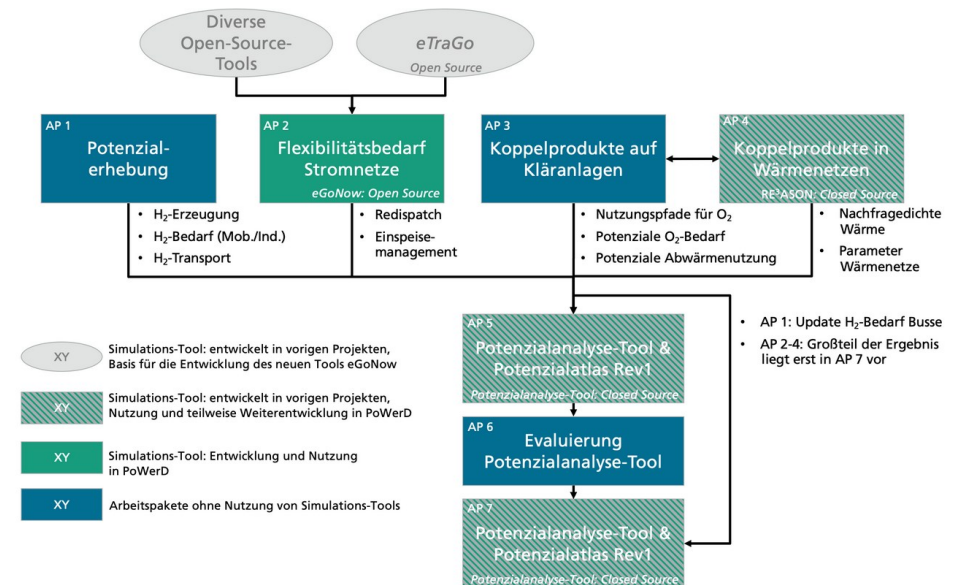
- Laut Entwurf der EU-Kommission vom 26.10.2022 sollen...
 - Kläranlagen ab 100.000 E Ausbaugröße bis 2030 mit einer 4. RS ausgestattet sein
 - Kläranlagen > 10.000 bis 100.000 E Ausbaugröße bis 2040, wenn Risiko für Mensch und Umwelt
 - Kläranlage > 10.000 E sollen bis 2040 energieneutral sein
- Kläranlagen sind auch Standorte für PV / Wind
 - Potenzial am Standort selbst und im Umfeld!
 - Potenzial auch über den Eigenbedarf hinaus

• Projekt PoWerD: **Potenzialatlas für eine Wasserstoffherzeugung in Deutschland**

- Identifikation von Standorten für PtH₂-Anlagen
- Potenziale für Wasserstoffnutzung, sowie wie Wärme und Sauerstoff
- Fokus: Nutzung H₂ in Industrie und Mobilität, Kläranlagen, Wärmenetze
- einem Schwerpunkt „Kläranlage“
- <https://www.bauing.uni-kl.de/wir/forschung-projekte/projekte-detailansicht/news/powerd>



Laufzeit: 2022-2024
<https://h2-powerd.de/>



Vielen Dank für die Aufmerksamkeit!

Bitte melden Sie sich bei Fragen



Dipl.-Ing. Oliver Gretzschel

<https://www.bauing.uni-kl.de/wir>

oliver.gretzschel@bauing.uni-kl.de



Dipl.-Ing. Yannick Taudien

<https://wiwmbh.de>

ytn@wupperverband.de



Dipl.-Ing. Benjamin Kihm

<https://www.hydro-ingenieure.de/>